



**University of  
Zurich**<sup>UZH</sup>

**Zurich Open Repository and  
Archive**

University of Zurich  
University Library  
Strickhofstrasse 39  
CH-8057 Zurich  
[www.zora.uzh.ch](http://www.zora.uzh.ch)

---

Year: 2011

---

## **Erfassung struktureller Waldparameter mithilfe von flugzeuggetragendem Laserscanning**

Morsdorf, F

**Abstract:** Airborne laser scanning is a relatively young and precise technology to directly measure surface elevations. With today's high scanning rates, dense 3-D pointclouds of coordinate triplets (xyz) can be provided, in which many structural aspects of the vegetation are contained. The challenge now is to transform this data, as far as possible automatically, into manageable information relevant to the user. In this paper we present two such methods: the first extracts automatically the geometry of individual trees, with a recognition rate of over 70% and a systematic underestimation of tree height of only 0.6 metres. The second method derives a pixel map of the canopy density from the pointcloud, in which the spatial patterns of vegetation cover are represented. These patterns are relevant for habitat analysis and ecosystem studies. The values derived by this method correlate well with field measurements, giving a measure of certainty ( $R^2$ ) of 0.8. The greatest advantage of airborne laser scanning is that it provides spatially extensive, direct measurements of vegetation structure which show none of the extrapolation errors of spot measurements. A large challenge remains in integrating these new products into the user's processing chains and workflows, be it in the realm of forestry or in that of ecosystem research.

DOI: <https://doi.org/10.3188/szf.2011.0164>

Other titles: Deriving structural forest parameters using airborne laser scanning

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-53910>

Journal Article

Published Version

Originally published at:

Morsdorf, F (2011). Erfassung struktureller Waldparameter mithilfe von flugzeuggetragendem Laserscanning. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 162(6):164-170.

DOI: <https://doi.org/10.3188/szf.2011.0164>

# Erfassung struktureller Waldparameter mithilfe von flugzeuggetragenen Laserscanning

Felix Morsdorf Remote Sensing Laboratories, Geographisches Institut, Universität Zürich (CH)\*

## Deriving structural forest parameters using airborne laser scanning

Airborne laser scanning is a relatively young and precise technology to directly measure surface elevations. With today's high scanning rates, dense 3-D pointclouds of coordinate triplets (xyz) can be provided, in which many structural aspects of the vegetation are contained. The challenge now is to transform this data, as far as possible automatically, into manageable information relevant to the user. In this paper we present two such methods: the first extracts automatically the geometry of individual trees, with a recognition rate of over 70% and a systematic underestimation of tree height of only 0.6 metres. The second method derives a pixel map of the canopy density from the pointcloud, in which the spatial patterns of vegetation cover are represented. These patterns are relevant for habitat analysis and ecosystem studies. The values derived by this method correlate well with field measurements, giving a measure of certainty ( $R^2$ ) of 0.8. The greatest advantage of airborne laser scanning is that it provides spatially extensive, direct measurements of vegetation structure which show none of the extrapolation errors of spot measurements. A large challenge remains in integrating these new products into the user's processing chains and workflows, be it in the realm of forestry or in that of ecosystem research.

**Keywords:** airborne laser scanning, forest height, forest cover, multispectral segmentation, land cover classification, multisensor fusion, knowledge transfer

**doi:** 10.3188/szf.2011.0164

\* Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich, E-Mail felix.morsdorf@geo.uzh.ch

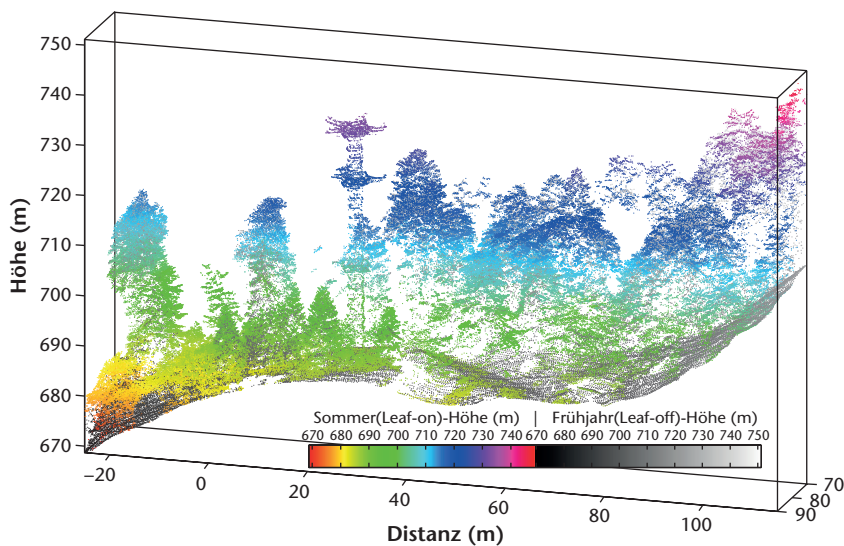
Waldbestände können auf viele verschiedene Arten charakterisiert werden, wobei die Kategorien Zusammensetzung, Funktion und Struktur aus waldwirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten wichtig sind. So ist Wissen über die Struktur des Waldes von grosser Relevanz beim Beschreiben von Waldbeständen und liefert notwendige Informationen über die vertikale und horizontale Organisation von Pflanzen (MacArthur & Horn 1969). Spezielle strukturelle Parameter wie Baumhöhe, Blattfläche und vertikale Schichtung (die wiederum eine Funktion von Bestandesgeometrie und Anordnung der Blattelemente ist) sind verknüpft mit wichtigen Prozessen im Wald, und sie sind fundamental, um die Dynamik dieses Ökosystems zu verstehen.

Fernerkundung ist seit ihren Anfängen verwendet worden, um räumliche Zusammenhänge in zwei (horizontalen) Dimensionen sichtbar zu machen, und Orthofotos und Satellitenbilder wurden erfolgreich für die Klassierung von Waldbeständen oder zur Erstellung von Waldmasken verwendet. Diese Produkte enthalten in erster Linie zweidimensionale Information, in einigen Fällen werden zu-

sätzlich Höheninformationen aus Stereoluftbildern abgeleitet. Diese Methode ist im Wald aufgrund der komplexen Oberflächenstruktur aber limitiert, so reduzieren Schattenwurf und Textur die Genauigkeit von Oberflächenmodellen aus Luftbildern. In vorliegendem Artikel wird eine neuartige Fernerkundungstechnologie vorgestellt, welche es erlaubt, zusätzlich und direkt die dritte, vertikale Dimension einzubeziehen. Zuerst wird kurz in die Methodik und in ihre direkten Datenprodukte eingeführt, dann werden exemplarisch zwei Methoden zur Ableitung von strukturellen Waldparametern präsentiert, und zum Schluss werden jüngste technologische und wissenschaftliche Entwicklungen mit Relevanz für den Forstbetrieb vorgestellt und diskutiert.

## Technologische Grundlagen

Flugzeuggetragenes Laserscanning (airborne laser scanning – ALS, light detection and ranging – Lidar) ist eine junge Fernerkundungsmethode, welche Oberflächenhöhen auf der Erdoberfläche durch ein



**Abb 1** Dreidimensionale Darstellung der ALS-Rohdaten, der sogenannten Punktwolke, im Gebiet Lägeren. Im Bild sind ein Mischwald und ein Messturm zu erkennen. Die Daten der Sommerbefliegung (August 2010) sind farbig, diejenigen der Frühjahrsbefliegung (April 2010) in Graustufen dargestellt. Man kann gut erkennen, dass die Daten der Frühjahrsbefliegung (Bäume in blattlosem Zustand) auch Geländeinformationen im Waldbereich liefern. leaf-off ALS-Daten: © Kantonsarchäologie Zürich

spezielles Messprinzip direkt erfassen kann. Hierzu wird ein kurzer Laserimpuls von der Messplattform zur Erdoberfläche gesendet und die Laufzeit bis zum Eintreffen des reflektierten Impulses gemessen. Da die Lichtgeschwindigkeit in der Erdatmosphäre als konstant angenommen werden kann, kann man aus dieser Laufzeit eine Entfernung bestimmen. In Kombination mit einer präzisen Messung der Position und Ausrichtung der Messplattform lässt sich daraus die Position der Reflexion an der Erdoberfläche ableiten. Diese kombinierte Bestimmung der Position und Ausrichtung wird mithilfe von differenziellem GPS und einem sogenannten inertialen Navigationssystem durchgeführt.<sup>1</sup> Das Messprinzip für ALS ist seit den 1960er-Jahren bekannt, aber erst in den 1990er-Jahren wurde die Technologie genau genug, um sie vom Flugzeug aus einsetzen zu können. Das direkte Produkt dieser Messung ist die sogenannte Punktwolke, welche aus xyz-Tripeln besteht, wobei jedes Tripel für ein Laserecho steht. Ein Beispiel einer solchen Punktwolke ist in Abbildung 1 dargestellt. Da sich Punktwolken aber sehr schlecht in organisierter Form speichern lassen und sehr grosse Datenmengen beinhalten können, werden sie in einem ersten Arbeitsschritt (zumeist beim Datenlieferanten) in Rastermodelle umgewandelt, welche sich einfach in einem geografischen Informationssystem (GIS) verarbeiten lassen. Aufgrund der Eigenschaft von ALS-Systemen, dass sie mindestens zwischen einem sogenannten ersten Echo und einem letzten Echo unterscheiden, kann man aus der Punktwolke ein digitales Oberflächenmodell (DOM) und unter Verwendung spezieller Filteralgorithmen ein digitales Geländemodell (DGM) erstellen (Kraus & Pfeifer 2001). Der Filterungsschritt zur Erstellung des DGM

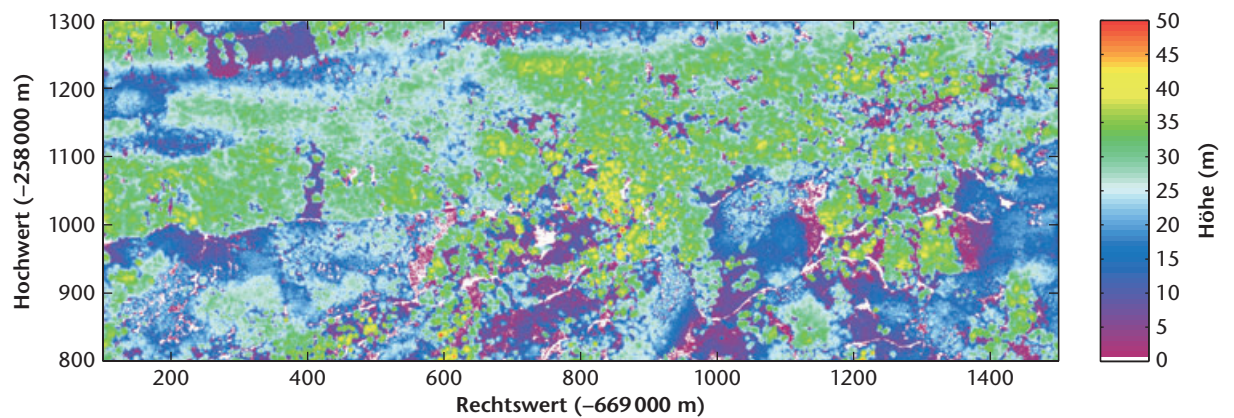
ist notwendig, da bei dichter Vegetation und Gebäuden das letzte Echo nicht vom Grund stammt.

Aus diesen beiden Rastermodellen lässt sich mit sehr wenig Aufwand bereits ein für die Forstwirtschaft relevantes Produkt ableiten, das sogenannte Vegetationshöhenmodell (VHM). In Abbildung 2 ist ein VHM für den Bereich der Lägeren zwischen Wettingen und Regensberg (CH) dargestellt. Ein Nutzer mit Erfahrung kann in diesem Modell sofort einzelne Bestände aufgrund ihrer Höheninformation und räumlichen Anordnung identifizieren. Allerdings geht im Verarbeitungsschritt von der Punktwolke zum DOM und DGM Information für die Beschreibung der Waldstruktur verloren, nämlich alle Echos, welche sich zwischen den ersten Echos und dem Boden befinden. Diese Information, so wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist, für die Beschreibung der Waldstruktur auszunutzen, ist Ziel der im Folgenden beschriebenen Ansätze.

## Strukturparameter auf Einzelbaumebene

Bei der Ableitung von Produkten aus Fernerkundungsdaten stellt sich immer auch die Frage der zu verwendenden Skalen, wobei eine obere Grenze meist durch die Auflösung des Sensorsystems vorgegeben ist. Für strukturelle Waldparameter wäre eine gebräuchliche Skala der Bestand, da auf dieser Ebene viele Waldinventuren durchgeführt werden. Allerdings ist die automatische Ableitung von Bestandesgrenzen aus ALS-Daten nicht trivial, weshalb häufig der Einzelbaum als Bezugsgrösse verwendet wird. Diese ist einfacher abzuleiten und auch sehr relevant. Bei den meisten Waldinventuren werden auf Bestandesebene geometrische Informationen einzelner Bäume erfasst, so zum Beispiel Baumhöhen und Kronendurchmesser. Bei ALS-Daten mit einer Auflösung (d.h. Punktdichte) von mehr als fünf Punkten pro Quadratmeter ist es möglich, die Geometrie von Einzelbäumen abzuleiten. Es gibt zwei Arten von Ansätzen: modellbasierte, welche das VHM nutzen (z.B. Popescu et al 2004), und solche, die direkt mit der Punktwolke arbeiten (Wang et al 2008). Eine gute Zusammenfassung der beiden Ansätze liefern Hyypä et al (2008). Die hier vorgestellte Methode gehört zu denjenigen, die auf der Punktwolke aufsetzen. Morsdorf et al (2004) entwickelten eine Methodik, die in zwei Arbeitsschritten die Punktwolke unterteilt und alle Laserechos, welche vermutlich von einem einzigen Baum stammen, in Gruppen zusammenfasst. Hierzu werden im VHM lokale Maxima gesucht und als Startpunkte einer überwachten Klassifikation verwendet («cluster analysis»). Der Merkmalsraum besteht in diesem Fall aus den drei Koordinaten x, y und

<sup>1</sup> Für eine eingehendere Beschreibung des Verfahrens vgl. Gachet & Junod (2008).



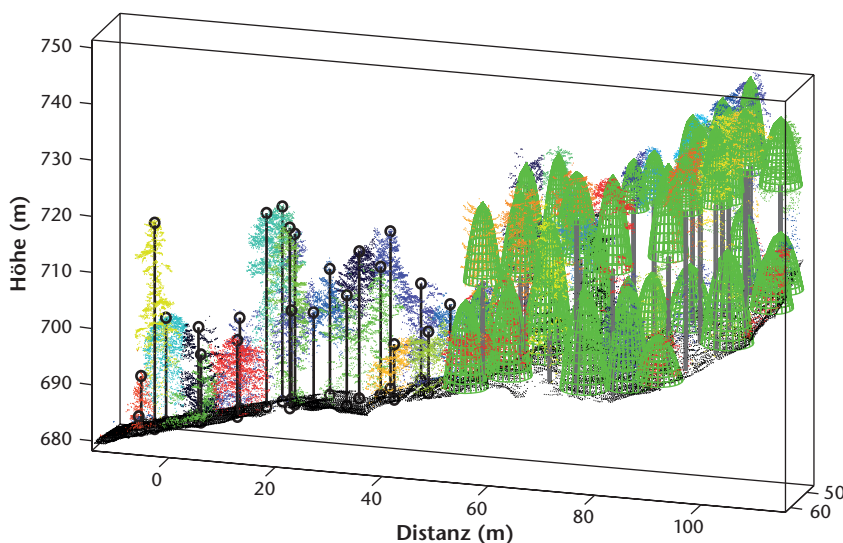
**Abb 2** Vegetationshöhenmodell (VHM) für den Bereich der Lägeren (CH). Die Pixelgrösse beträgt einen halben Meter, die Höhe ist farbig kodiert. Es lassen sich aufgrund der räumlichen Informationen einzelne Bestände erkennen und trennen.

z der Laserechos. Mithilfe einer euklidischen Distanzmetrik wird dieser Merkmalsraum unterteilt, und von den segmentierten Gruppen (links in Abbildung 3) werden geometrische Eigenschaften wie Position, maximale Höhe, minimale Höhe, Ausdehnung und Volumen bestimmt. Wenn die segmentierte Gruppe einem realen Baum entspricht, kann man diese Eigenschaften als Baumposition, Baumhöhe, Höhe der Kronenunterkante und Kronenvolumen übersetzen. Anschliessend kann man diese Informationen nutzen, um eine geometrische Rekonstruktion des Waldes durchzuführen (rechter Teil der Abbildung 3).

Dieser Ansatz wurde auf zwei verschiedenen Testflächen mit einer feldbasierten Einzelbauminventur validiert, einmal von den Autoren der Studie (LWF-Fläche der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL im Nationalpark, Nadelwald) und einmal unabhängig vom Geodätischen Institut Finnlands (Espoo bei Helsinki, Mischwald). Die Methode segmentiert in beiden Gebieten bestenfalls 70 bis 75% der dominanten Bäume korrekt. Die Bestimmung der Baumhöhen ist auf ca. 0.6 Meter genau, wobei die

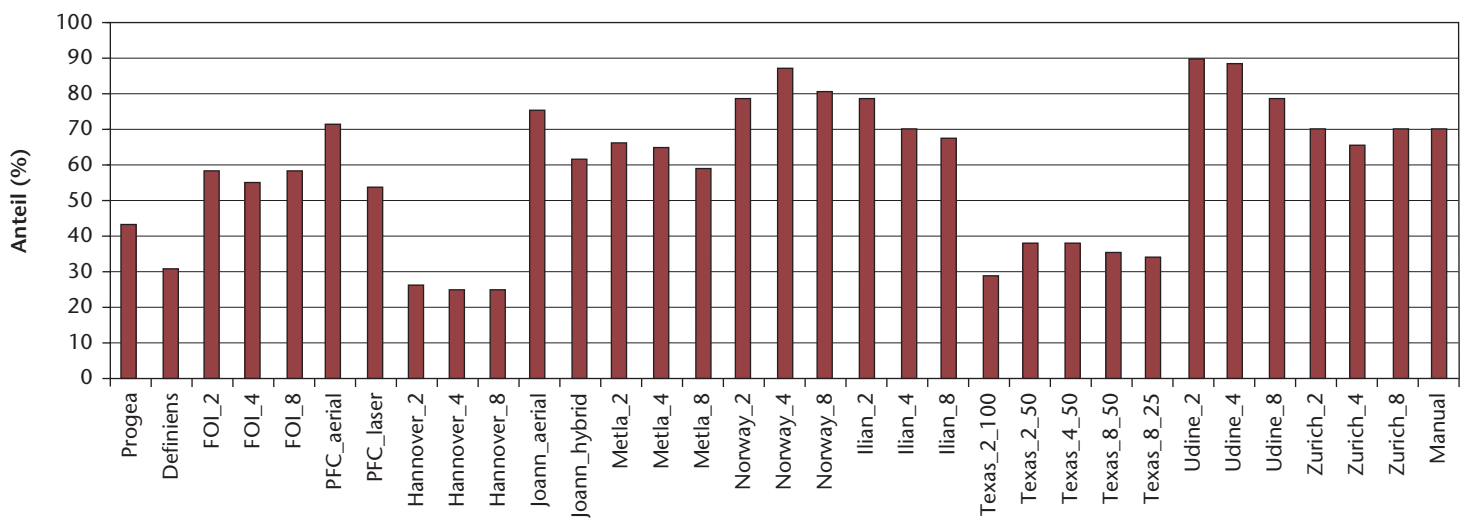
Baumhöhe systematisch um diesen Betrag unterschätzt wird. Diese Unterschätzung lässt sich sowohl durch ein gewisses Eindringen des Laserpulses in die Baumkrone erklären (bevor ein erstes Echo detektiert wird) als auch durch ein Abtastproblem: Für spitz zulaufende Kronen wie die von Nadelbäumen ist nicht gesichert, dass ein Laserpuls die Spitze trifft.

Ein Ziel der unabhängigen Evaluation von Methoden zur Extraktion von Einzelbauminformation aus ALS-Daten war, die Streuung der Methoden und Daten zu entkoppeln und zu prüfen, wie viel Variation durch die verschiedenen Methoden und wie viel durch Unterschiede in der Punktdichte verursacht wird. Insgesamt zwölf Universitäten und Institute haben bei diesem Vergleich mitgemacht, und wie man sehen kann (Abbildung 4), gibt es grosse Unterschiede in der Prozentzahl korrekt identifizierter Bäume. So gibt es Ansätze, die im Testgebiet nur circa 30% der Bäume korrekt identifizierten, aber auch einige Methoden, die immerhin 90% der einzelnen Bäume erfassen konnten. Also lässt sich festhalten, dass bei der Einzelbaumextraktion die Wahl der Methode einen grossen Einfluss auf das Ergebnis hat, die Punktdichte (2, 4 oder 8 Punkte pro Quadratmeter) hatte in diesem Mischwald bei Helsinki weniger Einfluss auf die Güte der abgeleiteten Informationen. In diesem Fall waren die Kronen der Bäume im Messgebiet wohl schon durch 2 Punkte/m<sup>2</sup> genügend charakterisiert. Auf der anderen Seite hingegen ist das digitale Terrainmodell der amtlichen Vermessung des Bundesamtes für Landestopografie Swisstopo (DTM-AV), welches eine mittlere Punktdichte von 0.25/m<sup>2</sup> aufweist, nicht für eine genaue Einzelbaumextraktion geeignet. Man müsste diese Studie noch einmal mit einer grösseren Variation der Punktdichte durchführen, um die genaue Grenze für verschiedene Waldarten festzulegen. Ein grosser Vorteil von einzelbaumbasierten Methoden ist jedoch, dass man die gewonnenen Informationen zu Bestandesinformationen aggregieren kann, wenn man Bestandesgrenzen, zum Beispiel aus einer manuellen Interpretation eines Luftbildes, hat.



**Abb 3** Schematische Darstellung der Prozesskette zur Einzelbaumextraktion von den erfassten und segmentierten Daten (Punktwolke, links) bis hin zum fertigen Produkt, einer geometrischen Rekonstruktion des Waldes mit geometrischen Primitiven (rechts).





**Abb 4** Prozentzahl korrekt extrahierter Bäume verschiedener Methoden (entlang der x-Achse sind die an der Vergleichsstudie beteiligten Institute aufgeführt; Kaartinen & Hyyppä 2007). Die Variabilität, die durch die Methoden hervorgerufen wird, ist für diesen Waldtyp deutlich grösser als die durch die verschiedenen Punktdichten (2, 4 und 8/m<sup>2</sup>) verursachten Unterschiede. Manual steht in diesem Fall für die visuelle Interpretation durch einen Auswerter. Beteiligte Institute: Progea Consulting and Agricultural University of Cracow, Definiens, Swedish Defense Research Agency (FOI), Pacific Forestry Centre (PFC), University of Hannover, Joanneum Research, Finnish Forest Research Institute (Metla), Norwegian Forest Research Institute and University of Life Sciences, National Ilian University, Texas A&M University, University of Udine and University of Zurich.

### Strukturparameter auf Pixelbasis

Ein grosser Vorteil der Fernerkundung ist, dass sie immer ein räumliches kontinuierliches Feld liefert, wohingegen traditionelle Feldmessungen meist auf Stichproben und einer Extrapolation dieser Punktmessungen auf die Fläche basieren. Diese Extrapolation ist natürlich fehlerbehaftet, besonders wenn die Waldstruktur, wie in der Schweiz, eher kleinräumig und heterogen ist. Auf der anderen Seite können einige von der Forstwirtschaft gewünschte Grössen wie zum Beispiel der Bruthöhendurchmesser nicht direkt aus Laserdaten abgeleitet werden, sodass man empirische Modelle benötigt, um sie aus der Regression mit sogenannten ALS-Prediktorvariablen abzuleiten. Næsset et al (2002, 2005a, 2005b) haben diese Methoden in Skandinavien für die Forstinventur eingeführt und auch operationalisiert. Sie haben dazu Feldmessungen der gewünschten Zielgrössen auf Bestandesebene mit einem ALS-Trainingsdatensatz kombiniert und daraus Regressionsmodelle entwickelt. Diese wurden dann auf den gesamten ALS-Datensatz angewendet, um Karten von Zielgrössen wie zum Beispiel dem Holzvorrat zu erstellen. Diese haben dann eine räumliche Auflösung von beispielsweise 10 bis 20 Metern. Allerdings sind diese Modelle (ähnlich wie allometrische Beziehungen) mit Fehlern und einer gewissen Ortsbezogenheit behaftet. Ein Modell, welches in einem Mischwald im Mittelland funktioniert, wird sicher nicht ohne Weiteres auch im alpinen Raum in einem Bergföhrenbestand gültig sein. Es bietet sich daher an, direkt aus den ALS-Daten physikalische Grössen abzuleiten, die die vom ALS erfasste Struktur wiedergeben und die, mit den entsprechenden lokalen Experten-

modellen verknüpft, die relevante Information (z.B. in Form von Zielgrössen) liefern. Wichtig ist, dass man den kostspieligen Schritt der Kalibrierung von Regressionsmodellen anhand von Feldmessungen vermeiden kann. Ein Beispiel für derartige Produkte sind neben der Einzelbaummethodik die Karten der Vegetationshöhe (das VHM, Abbildung 2), jeweils mit einer durch die Punktdichte vorgegebenen Auflösung, die in den meisten Fällen zwischen zwei Meter (DOM-AV der Swisstopo) und einem halben Meter (Abbildung 2) liegt. Aber nicht nur die Höhe der Vegetation lässt sich aus ALS-Daten genau ableiten, sondern auch Parameter, die die Dichte der Vegetation beschreiben. Hierbei werden in der Forschung häufig zwei Grössen betrachtet: der Deckungsgrad und der Blattflächenindex. Der Deckungsgrad gibt für eine gewählte Fläche (zum Beispiel ein Pixel) an, wie viel Prozent dieser Fläche von Vegetation bedeckt ist. Der Blattflächenindex ist ein einheitenloser Parameter, der definiert, wie viel Blattfläche relativ zu einer gewählten Bodenfläche in der Vegetationssäule vorhanden ist. Während die Definition dieser Parameter relativ einfach ist, ist deren Erfassung im Feld sehr kompliziert. Meist werden indirekte Methoden angewendet, die aus der Fernerkundung bekannt sind, aber vom Boden aus eingesetzt werden. So werden der Blattflächenindex und der Deckungsgrad häufig aus digitalen hemisphärischen Fotografien (DHP) unterhalb der Baumkronen abgeleitet (Danson et al 2007).

Analog kann man den Deckungsgrad aus der ALS-Punktwolke auch aus dem Verhältnis von Vegetations- und Bodenechos in einem gewählten Zielraster ableiten (Abbildung 5). Hierfür muss lediglich ein geeigneter Hörschwellenwert gewählt werden, um die Bodenechos von Vegetationsechos zu tren-

nen. Wenn man dieses mit DHP validiert, erhält man hohe Bestimmtheitsmasse ( $R^2 > 0.8$ , Morsdorf et al 2006). Allerdings muss man je nach Sensor und verwendeten Detektionsmethoden die ALS-Bedeckungsgrade mit denen aus den DHP-Aufnahmen kalibrieren. Weil es sich dabei um eine physikalische Kalibration und nicht um ein empirisches Regressionsmodell handelt, sollte die Methode generell transportabel sein. So muss sie nur neu kalibriert werden, wenn der ALS-Sensor ausgetauscht wird, nicht aber, wenn in ein anderes Ökosystem gewechselt wird. Deckungsgradkarten sind beispielsweise für Habitatanalysen von grosser Relevanz. So kann die Fraktionierung eines Lebensraumes mit der Kombination der Höheninformation und der Vegetationsdichte sehr gut nachvollzogen werden (Hyde et al 2006, Bergen et al 2009, Graf et al 2009, Martinuzzi et al 2009, Vospernik & Reimoser 2008).

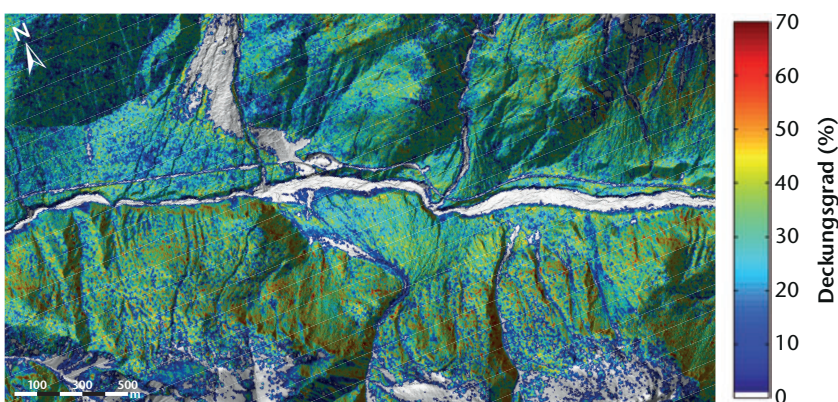
### Aktuelle methodische und technologische Entwicklungen

Derzeit wird auch die zusätzliche Verwendung der Intensität des zurückgestreuten Signals in ersten Studien getestet. In der Theorie sollte die ALS-Intensität leicht radiometrisch zu kalibrieren und nicht, wie passiv optische Daten, von Schattenwurf beeinträchtigt sein. Ein spezieller Mehrwert wird für die Unterscheidung von verschiedenen Baumarten erwartet. Erste Resultate schauen vielversprechend aus. Allerdings ist die Intensität bei den ALS-Daten (wie bei den passiv optischen Daten auch) sowohl von der Struktur als auch von den optischen Eigenschaften der Vegetation abhängig, sodass man diese beiden Grössen nur zusammen ableiten kann. Wenn diese Kombination aber für eine Baumart ähnlich ist und für eine andere Baumart anders, so lässt sich die Intensität zumindest als zusätzliche Information zur Unterscheidung von Baumarten einsetzen (Holm-

gren et al 2008, Kim et al 2009, Ørka et al 2009, Morsdorf et al 2010). Die operationelle Auswertung von Intensitätsdaten benötigt allerdings noch einiges an Forschungsarbeit.

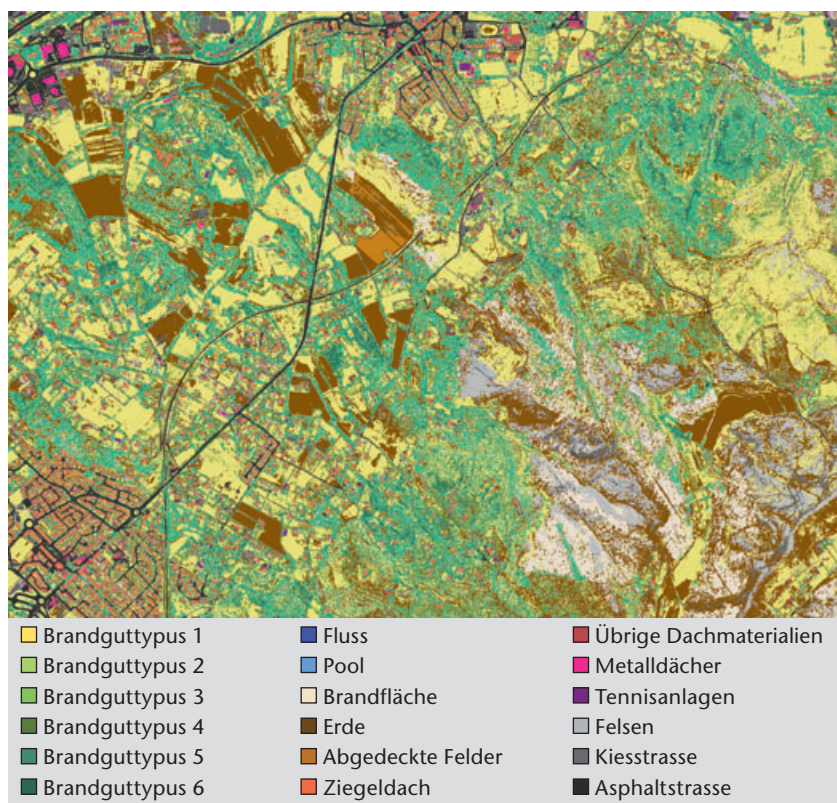
Neuere ALS-Systeme wie der Riegl LMS Q560/Q680 oder Optech ALTM 3100/Gemini (mit Waveform-Digitizer) können über die Detektion von ersten und letzten Echos hinaus auch das volle zurückgestreute Signal aufzeichnen, die sogenannte «full-waveform». Hier bieten sich nun zwei Vorteile: Zum einen kann man weitere Echos zwischen erstem und letztem detektieren («multiple echos»), und zum anderen kann man neben der Lage und Intensität eines Echos auch dessen Breite erfassen. Die Echobreite ist je nach Oberflächenstruktur unterschiedlich und ist im Wald zum Beispiel deutlich grösser als bei relativ glatten Oberflächen wie Asphalt, Kies oder Gras. Wagner et al (2008) haben gezeigt, dass die Echobreite hilfreich ist, um bodennahe Objektechos zu maskieren und aus der DGM-Interpolation auszuschliessen. Somit lassen sich im Wald glattere und genauere Geländemodelle erzeugen, welche wiederum die Genauigkeit der Baumhöhenmessung erhöhen. Die korrekte Erfassung der Geländehöhe hat einen ebenso grossen Einfluss auf die Messung der Baumhöhe wie zum Beispiel Unterschätzungen im DOM durch fehlende Echos an den Baumspitzen. Von speziellem Interesse könnte die Echobreite auch für die Baumartenunterscheidung sein (Reitberger et al 2008), da die vertikale Verteilung der Bauelemente häufig eine Funktion der Baumart ist. Ferner muss die Echobreite nicht so aufwendig wie die Intensität kalibriert werden.

Für die Unterscheidung von einzelnen Baumarten ist die Kombination von ALS-Daten mit passiv optischen Daten, zum Beispiel von abbildenden Spektrometern, von Interesse. Dies ist im Moment ein sehr aktiver Forschungszweig, und viele ALS-Kampagnen werden bereits heute mit Luftbildern oder gar spektral hochauflösenden Sensoren durchgeführt. Synergien und Mehrwerte bieten sich an unterschiedlichen Stellen der Prozesskette, weswegen die Kombination von unterschiedlichen Datentypen immer mehr Schule machen wird. So kann ein DGM oder ein DOM eines flugzeuggetragenen Laserscanners sehr gut zur Georeferenzierung von Bilddaten verwendet werden, und auch die Berechnung von verzerrungsfreien Orthofotos (sog. true-orthophotos) wird möglich. Der grösste Nutzen ergibt sich jedoch auf der Seite der Produkte. So konnten Koetz et al (2008) zum Beispiel zeigen, dass eine Landnutzungsklassifikation mit Vegetationsklassen deutlich besser wird, wenn man die Daten eines abbildenden Spektrometers mit Daten eines ALS kombiniert (die User Accuracy erhöht sich um 19%). Hierzu wurden aus den ALS-Rohdaten Verteilungen der Echohöhen (zum Beispiel für sechs Höhenstufen) für jedes Bildpixel des abbildenden Spektrometers berechnet.



**Abb 5** Karte des Deckungsgrades des Waldes im Bereich des Ofenpasses im Schweizer Nationalpark. Die Auflösung beträgt hier 5 m, und es ist zu beachten, dass die absoluten Werte des Deckungsgrades direkt von der gewählten Auflösung abhängen. Im Gegensatz zu passiv optischen Verfahren wird hier der Deckungsgrad für Objekte über 1.25 m Höhe angegeben, weswegen Alpwiesen automatisch in Grau erscheinen.





**Abb 6** Ergebnis einer kombinierten Landnutzungsklassifikation aus Bildspektrometrie und ALS-Daten (Frischknecht et al 2010). Die vertikale Information aus den ALS-Daten bringt einen deutlichen Mehrwert in der Unterscheidung von Vegetationsklassen (die Brandguttypen 1–6 bestehen aus unterschiedlichen Vegetationstypen, welche sich in erster Linie durch Höhe und Deckungsgrad unterscheiden).

Diese wurden dann mit den Bildpixeln kombiniert, sodass weitere sechs Kanäle mit Höheninformation zu den circa 100 spektralen Kanälen hinzugefügt wurden. Dieser kombinierte Rasterdatensatz lässt sich mit den meisten herkömmlichen GIS-Anwendungen weiterverarbeiten und klassieren, enthält aber trotzdem mehr vertikale Strukturinformation als das DGM und das DOM (Abbildung 6).

## Ausblick

Flugzeuggetragenes Laserscanning hat sich in den letzten Jahren zur Technologie der Wahl für die Abschätzung von Strukturparametern im Wald entwickelt (Hyypä et al 2008). Es ist möglich, Parameter wie Baumhöhe (oder Vegetationshöhe) und Deckungsgrad mit einem hohen Automationsgrad und hohen Genauigkeiten aus ALS-Daten abzuleiten. Weiterführende Produkte wie Bestandesdichte, Brusthöhendurchmesser (BHD) oder Holzvorrat lassen sich aus diesen mehr oder weniger direkten Messungen über lokale Allometrien schätzen. Gegenüber traditioneller, feldbasierter Inventur bietet ALS die Vorteile der flächigen und direkten Messung der Vegetationsstruktur, aber auch den Nachteil, dass Grössen wie der BHD nicht direkt ableitbar sind. Die zu Beginn relativ hohen Kosten sind massiv gefallen, sodass sich ALS-basierte Waldinventuren jetzt

mit ähnlichem finanziellem Aufwand durchführen lassen wie solche mit herkömmlichen Luftbildern. In Ländern mit grossen, homogenen Waldgebieten (wie zum Beispiel Skandinavien) wird ALS auch schon operationell in der Waldinventur eingesetzt. Allerdings liegen die Stärken der Technologie eigentlich in heterogenen und schwer zugänglichen Waldgebieten, wie sie in der Schweiz häufig anzutreffen sind. Hier gilt es, darauf hinzuwirken, dass die Charakteristik von ALS-Daten, die ohnehin von nationalen und kantonalen Vermessungsämtern erhoben werden, auch an die Bedürfnisse der am Wald interessierten Gruppen angepasst werden. Dies bedingt in erster Linie genügend hohe Punktdichten, wobei eine Anzahl von circa fünf Punkten pro Quadratmeter für die meisten Anwendungen ausreichend sein sollte, aber auch die Verfügbarkeit von Metadaten wie Befliegungszeitpunkten und Flugpfaden, um die Daten zukunftssicher zu machen. Weiterhin müssen Forschungsinstitute und Universitäten bereit sein, durch Wissenstransfer dafür zu sorgen, dass neue Entwicklungen auch ihren Weg zu den Anwendern finden. Dieses bedeutet aber auch, dass die Anwender traditionelle Konzepte und Herangehensweisen überdenken müssen, damit sie maximal von den neuen Produkten profitieren können.

Eingereicht: 30. Juni 2010, akzeptiert (mit Review): 9. Februar 2011

## Dank

Die Beschaffung der ALS-Datensätze, auf welchen diese Arbeit basiert, wurde im Wesentlichen durch zwei Projekte ermöglicht. Dies sind die EU-Projekte «Forest Fire Spread and Mitigation (SPREAD)» und «FireParadox» mit den EU-Vertragsnummern EVG1-CT-2001-00027 und FP6-018505. Die ALS-Daten der Leaf-off-Kampagne der Lägeren wurden durch die Kantonsarchäologie Zürich erhoben.

## Literatur

- BERGEN KM ET AL (2009) Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *J Geophys Res* 114 (G00E06): 1–13. doi: 10.1029/2008JG000883
- DANSON FM, HETHERINGTON D, MORSDORF F, KOETZ B, ALLGÖWER B (2007) Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *IEEE Geosci Remote S* 4: 157–160.
- FRISCHKNECHT C, KNEUBÜHLER M, MORSDORF F (2010) Brandguttdifferenzierung in einem Wildland-Urban-Interface mit Hilfe von Laser Scanning und Bildspektrometrie. [www.zora.uzh.ch/35484](http://www.zora.uzh.ch/35484) (22.3.2011)
- GACHET G, JUNOD P (2008) Apports et perspectives de la technologie LiDAR aéroporté pour la pratique forestière. *Schweiz Z Forstwes* 159: 19–30. doi: 10.3188/szf.2008.0019
- GRAF R, MATHYS L, BOLLMANN K (2009) Habitat assessment for forest dwelling species using LiDAR remote sensing: Capercaillie in the Alps. *For Ecol Manage* 257: 160–167.

- HOLMGREN J, PERSSON A, SÖDERMAN U (2008) Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. *Int J Remote Sens* 29: 1537–1552.
- HYDE P ET AL (2006) Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sens Environ* 102: 63–73.
- HYYPÄE J ET AL (2008) Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *Int J Remote Sens* 29: 1339–1366.
- KAARTINEN H, HYYPÄE J (2007) EuroSDR/ISPRS Project Commission II "Tree Extraction". Final Report. Masala: Finnish Geodetic Institute. 52 p.
- KIM S, MCGAUGHEY RJ, ANDERSEN HE, SCHREUDER G (2009) Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sens Environ* 113: 1575–1586.
- KOETZ B, MORSDORF F, VAN DER LINDEN S, CURT T, ALLGÖWER B (2008) Multi-source land cover classification for forest fire management based on imaging spectrometry and LiDAR data. *For Ecol Manage* 256: 263–271.
- KRAUS K, PFEIFER N (2001) Advanced DTM generation from LIDAR data. *Int Arch Photogramm Remote Sensing* 34 (3/W4): 23–35.
- MACARTHUR RH, HORN HS (1969) Foliage profile by vertical measurements. *Ecology* 50: 802–804.
- MARTINUZZI S ET AL (2009) Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability. *Remote Sens Environ* 113: 2533–2546.
- MORSDORF F ET AL (2004) LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sens Environ* 3: 353–362.
- MORSDORF F, KOETZ B, MEIER E, ITTEN K, ALLGÖWER B (2006) Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sens Environ* 104: 50–61.
- MORSDORF F ET AL (2010) Discrimination of vegetation strata in a multi-layered Mediterranean forest ecosystem using height and intensity information derived from airborne laser scanning. *Remote Sens Environ* 114: 1403–1415.
- NÆSSET E (2002) Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens Environ* 80: 88–99.
- NÆSSET E, BOLLANDSÅS OM, GOBAKKEN T (2005) Comparing regression methods in estimation of biophysical properties of forest stands from two different inventories using laser scanner data. *Remote Sens Environ* 94: 541–553.
- NÆSSET E, GOBAKKEN T (2005) Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. *Remote Sens Environ* 96: 453–465.
- ØRKA HO, NÆSSET E, BOLLANDSÅS OM (2009) Classifying species of individual trees by intensity and structural features derived from airborne laser scanner data. *Remote Sens Environ* 113: 1163–1174.
- POPESCU SC, WYNNE RH (2004) Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogramme Eng Rem S* 70: 589–604.
- REITBERGER J, KRZYSZEK P, STILLA U (2008) Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *Int J Remote Sens* 29: 1407–1431.
- VOSPERNIK S, REIMOSER S (2008) Modelling changes in roe deer habitat in response to forest management. *For Ecol Manage* 255: 530–545.
- WAGNER W, HOLLAUS M, BRIESE C, DUCIC V (2008) 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *Int J Remote Sens* 29: 1433–1452.
- WANG Y, WEINACKER H, KOCH B (2008) A lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest. *Sensors* 8: 3938–3951.

## Erfassung struktureller Waldparameter mithilfe von flugzeuggetragenen Laser-scanning

Flugzeuggetragenes Laserscanning ist eine neue und genaue Methode, um Objekthöhen auf der Erdoberfläche zu messen. In Kombination mit hohen Abtastraten liefert es einen dichten 3-D-Datensatz, in welchem viele Aspekte der Vegetationsstruktur enthalten sind. Die Herausforderung liegt nun darin, diese Daten möglichst automatisiert in für Anwender relevante und handhabbare Produkte umzuwandeln. Wir stellen in dieser Arbeit zwei solche Methoden vor: Die erste erfasst automatisiert die Geometrie von einzelnen Bäumen, mit Erkennungsraten von mehr als 70% und einer systematischen Unterschätzung der Baumhöhen von lediglich 0.6 Meter. Die zweite leitet eine Pixelkarte des Deckungsgrades ab, in der die für Habitatanalysen relevante räumliche Struktur der Vegetationsdichte wiedergegeben wird. Auch hier korreliert die Methodik sehr gut mit Feldmessungen, mit einem Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) von 0.8. Der grosse Vorteil von flugzeuggetragenen Laserscanning ist, dass es flächige, direkte Messungen der Struktur liefert, die keine Extrapolationsfehler von Punktmessungen aufweisen. Eine grosse Herausforderung ist momentan die Integration dieser neuen Produkte in die Prozessketten der Anwender, sei es im Bereich der Forstwirtschaft oder im Bereich der Ökosystemforschung.

## Relevés de paramètres structuraux de la forêt à l'aide d'un balayeur laser aéroporté

Le balayage laser aéroporté est une nouvelle méthode de précision pour mesurer la hauteur d'objets par rapport au sol. Le grand nombre de relevés permet d'obtenir des données 3D denses qui contiennent beaucoup d'informations sur la structure de la végétation. Le défi est de transformer de manière aussi automatisée que possible ces données en produits pertinents et praticables par les utilisateurs. Dans cet article, nous vous présentons deux de ces méthodes: la première saisit automatiquement la géométrie des arbres individuels. Le taux de reconnaissance est de plus de 70%, mais la hauteur est systématiquement sous-évaluée de 0.6 mètres. La seconde méthode dérive des données une carte pixellisée du degré de couverture, qui permet de représenter la structure spatiale de la densité de végétation pertinente pour l'analyse des habitats. La méthodologie corrèle très bien avec les relevés de terrain, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0.8. Le grand avantage du balayage laser aéroporté réside dans le fait que les relevés se font directement sur l'ensemble de la surface et que l'on évite ainsi les erreurs d'extrapolation de relevés ponctuels. Le grand enjeu actuellement est de réussir à intégrer ces nouveaux produits dans les processus des utilisateurs, aussi bien dans le domaine de la foresterie que celui de la recherche écosystémique.